地熱発電設備の現状と動向

稲垣 正太郎（いながき　まさたろう）

1　まえがき

地熱発電は地中深くに存在する熱エネルギーを蒸気や熱水の形で取り出し発電に利用するものである。化石燃料を使用する火力発電，核燃料を使用する原子力発電と異なり，燃料を輸送することができないので，地熱発電は地熱エネルギーを産出できる地域で開発されている。

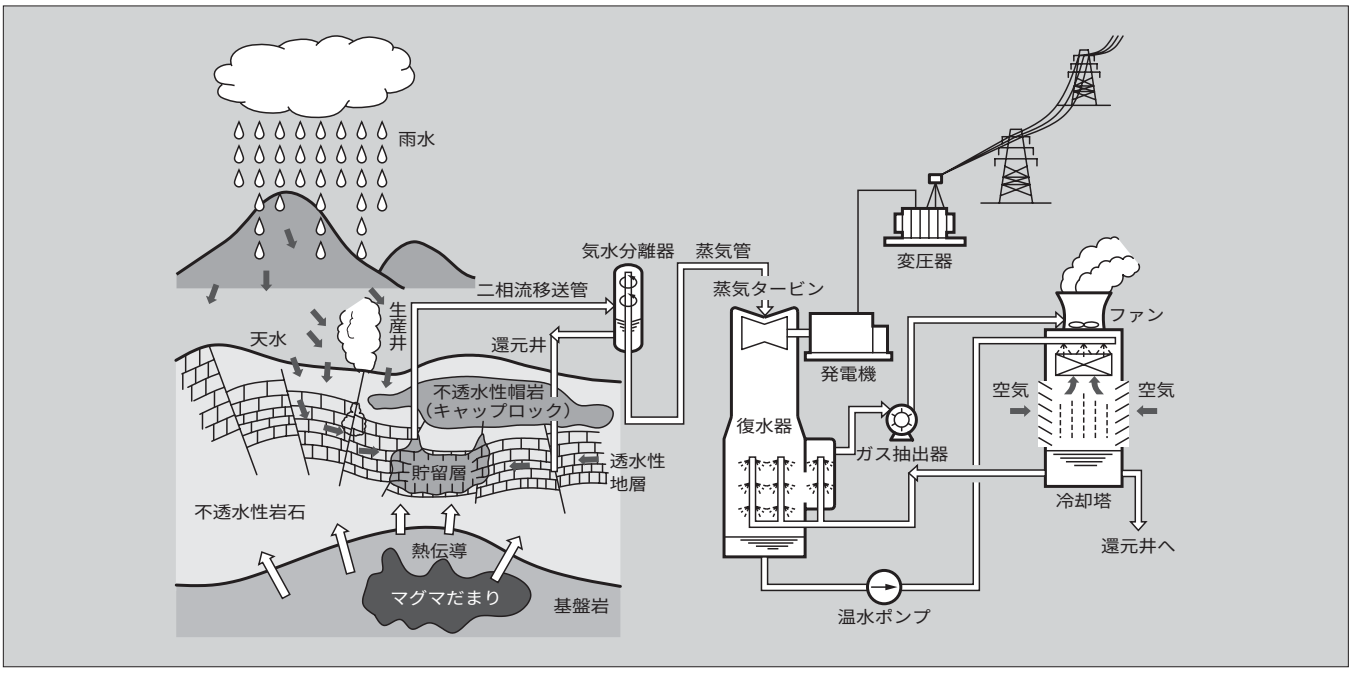
本稿では地熱発電の仕組みについて簡単に紹介し，世界の地熱発電の現状が東南アジア経済危機の影響により予想を下回る伸びであったこと，今後は経済復興と電力需要の伸びと低迷期の反動で大きく伸びると予想していることについて紹介する。

2　地熱発電の仕組み

図1に地熱発電の仕組みの概要を示す。現在の地球中心部の温度は5,000～6,000 ℃と推定されており，地球の表面に向けて熱が放出されている。この熱はマントル（地下30～2,900 km）では大規模な対流を生み出しているが，地球の最表層部を作る地殻（プレート，平均厚さ約30 km）内部では伝導熱として地表に伝えられている。これによる平均的地下増温率は深度100 m あたり3 ℃といわれており，特別の熱源がない限り，これだけでは高温の地熱資源を作り出すことはできない。地球の表面は十数枚のプレートによって覆われている。そのプレート境界では活発な地殻変動を起こしており，それらが世界の火山帯となっている。そこでは地殻に進入し取り残された約800～1,200 ℃のマグマだまりが地下数 km から10 km 程度の比較的浅い部分に存在している。地熱資源とはこの高温のマグマだまりからの熱伝導により熱せられた地下水をいう。[1]

地熱水の起源については，古くは諸説があったが，現在では天水（雨水）起源説で結論が出ている。地上に降った

図1　地熱発電の仕組み



稲垣 正太郎

火力・地熱発電所の機械・配管設備のエンジニアリング業務に従事。現在，富士電機システムズ株式会社発電プラント本部火力統括部地熱技術部長。火力原子力協会会員。

雨水は地下に浸入し地下水となる。地下水は地中で流れを作り，地層中の透水性の高い砂岩や断層などの破砕帯，地層の境界部などの不連続部分などで貯留している。これらが先のマグマだまりにより温められ，地熱貯留層と呼ばれる地下資源（地熱水）となっている。

地下が高透水性の地層だけの場合は，上部や周囲からの低温流体の進入などがあり，発電用の資源としては無理があるが，日本人は昔から温泉として利用している。地熱貯留層の上部に透水性の低い地層（帽岩：キャップロック）が存在し高温の地熱流体を閉じ込めているような場所では，地熱発電に利用できる地下資源となる。すなわち，マグマだまり（熱源），透水性の貯留層，キャップロックそして十分な天水（雨水）の補給という4条件がそろった地域が地熱発電所の建設に最も適した地域となる。このような地域を探査・評価し地熱発電地域として開発することになる。地熱貯留層から熱水や蒸気を取り出す井戸を生産井，利用済みまたは利用できない温水を再び地中に戻す井戸を還元井と呼んでいる。

地熱貯留層から取り出せる流体が蒸気のみの場合，利用しやすいので1920年代から発電所が建設された。イタリア・ラルレデロ地区やアメリカのガイザース地区が有名である。その後，地熱貯留層から取り出せる流体が熱水の場合でも減圧させて蒸気を発生させるシングルフラッシュサイクルが開発され，地熱の開発は飛躍的に伸びた。ここではシングルフラッシュ地熱発電について説明する。

その仕組みを**図1**の右側に示す。地熱貯留層から取り出された地熱流体は蒸気と熱水の混合した気液二相流として，気水分離器（遠心力を利用したサイクロンセパレータ）に移送され，そこで蒸気と熱水に分離される。蒸気は配管でタービンに送られタービン・発電機を駆動する。発電された電気は変圧器から配電網を経由して消費地に送られる。また気水分離器で分離された熱水はそのまま還元井に送られ，地中に戻されて最終的に地熱貯留層に還元する。蒸気タービンは，下流の復水器と呼ばれる凝縮器で排気蒸気と冷却水を混合してできる温水の飽和圧力まで仕事を行う。温水温度はおよそ40～50 ℃，復水内圧力は0.008～0.012 MPa（絶対圧力）の真空となっている。温水は温水ポンプによって冷却塔の上部に運ばれ，貯水槽に落下する間に空気と接触し冷却される。冷却塔貯水槽からは，大気圧力と復水器真空の差圧で復水器に戻り，再び復水器冷却水として利用される。復水器に流入する蒸気量と冷却塔で蒸発し消滅する蒸気量の差は冷却塔水槽から還元井に戻され地中に還元される。

地熱蒸気には蒸気に対して質量で0.5 %から数%程度の二酸化炭素を中心とした不凝縮ガスが含まれている。これらは復水器内で凝縮しないので，ガス抽出器（蒸気エジェクタや真空ポンプ，またはそれらを組み合わせた装置）によって大気圧まで圧縮し系外へ放出している。このガス抽出設備は通常の火力発電所の復水器空気抽出器に比べ非常に大きな容量を有しており，地熱発電の特有の重要な設備である。不凝縮ガスには微量の硫化水素ガス（H_2S）も含まれているので，アメリカのように硫化水素ガスの放出拡散に厳しい規制がある場合は，大気に放出せず硫化水素除去装置を設ける。硫化水素ガスは銅および銅合金を著しく腐食させるので，各種の電気品はこのための対策が施されている。

ダブルフラッシュサイクルとは気水分離器で分離された熱水をさらに減圧し，低圧の蒸気を発生させてタービンの中段に送りプラント効率を高めるように計画されたものである。

3　日本の地熱発電の現状と動向

日本では1973年10月に発生した第一次オイルショックを契機としてエネルギーの多様化が叫ばれ，地熱発電が新エネルギーとして見直されて，国を挙げて地熱開発に取り組んだ。そして，1973年には設備容量で50 MW程度であった地熱発電所は，1995年までの約20年間で建設中も含めて16か所・18台，合計設備容量545 MWとなった。しかし，その後新たに建設された設備は，富士電機が1999年に東京電力株式会社向けに納入した八丈島発電所（3.3 MW）のほかは，九重観光ホテルの九重発電所（2 MW），九州電力株式会社八丁原発電所の地熱バイナリーサイクル発電所（2 MW）のみであり，現在も建設計画はない。日本の地熱発電設備容量は現在548.9 MWであり世界第6位であるが，近々第7位のニュージーランドに追い抜かれる。

「地熱発電の開発の意義と課題[(2)]」によれば，地熱発電の優れた特徴は，

(1)　クリーンな自然エネルギー
(2)　純国産エネルギー
(3)　わが国に豊富に賦存するエネルギー
(4)　再生可能な自然エネルギー
(5)　燃料が不要
(6)　稼動率と設備利用率が高くベース電源として安定供給に寄与

などが挙げられている。しかし一方で解決すべき課題として，

(1)　地下の地熱資源把握に伴うリスク
(2)　蒸気生産のための掘削費を含む初期投資額が大きい
(3)　大容量の発電所ができ難い
(4)　地熱資源分布の偏在
(5)　周辺環境との調和，既設温泉との共存共栄
(6)　法規制

などが挙げられている。特に電力自由化の現状では事業採算性が重要視される。効果的な資金の利用とリスクの回避をどのようにマネージできるか今後の課題の一つとして報告されている。

明るい見通しとしては，日本には温泉地を含め未利用の蒸気・熱水が存在している。これらを利用する「小規模バイナリー発電」などは，掘削費の削減と短いリードタイムで経済性のある地熱発電として期待できると考えられる。

特に，2003 年度から施行された「電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法」（RPS 法）では，地熱バイナリー発電がこの適用を受けることから期待が高まっている。

4　海外の地熱発電の現状と富士電機の納入実績

第一次オイルショック以降，海外でも 1990 年まで 5 年単位で平均 20 %以上の順調な伸びを示していた。富士電機は 1977 年に中米・エルサルバドル電力庁に 40 MW 地熱発電所を受注したのを契機として本格的に地熱発電の分野に進出した。二十数年が経過した現在では，納入実績は**図 2** に示すように世界 8 か国，50 台，合計容量ですでに 1,558 MW に達している。これは 2005 年における世界の地熱発電設備容量（8,926 MW）の約 17.5 %を占める。1995 年以降に営業運転に入ったプラントは EPC 契約（一つのサプライヤーにプラント完成の全責任を負わせるもの）で取りまとめたフィリピン・マリトボグ発電所（3×77.5 MW），エルサルバドル・ベルリン発電所（2×28.1 MW），インドネシア・ワヤンウィンド発電所（1×110 MW）（**図 3** に発電所全景，**図 4** に生産井基地を示す）をはじめ，タービン発電機単体を EPC 契約者に納入したインドネシア・グナンサラク発電所（3×55 MW），ニュージーランド・ポイヒピ発電所（1×55 MW），アイスランド・スバルトセンギ発電所 5 号機（1×30 MW）およびアメリカ・ソルトンシー発電所 5 号機（1×58.3 MW）である。

表 1 に，1990 年，1995 年，2000 年，2005 年の設備容量（予測）と 2000 年時点で予想していた 2005 年の予想設備容量を示す。

この表によると，1995 年から 2005 年の間に建設された世界の地熱発電設備容量は，2,092 MW であり，このうち富士電機は 734.1 MW，約 35 %を占めた。

2000 年に予想した 2005 年の設備容量と現状とでは乖離（かいり）が大きい。しかし，これは 1997 年のタイ・バーツの暴落に端を発した東南アジアの通貨危機以降，世界経済の停滞などにより資金難や電力需要減などで地熱発電所建設が伸びなかったためと思われる。特に，インドネシア，

図 3　ワヤンウィンド地熱発電所の全景（航空写真）

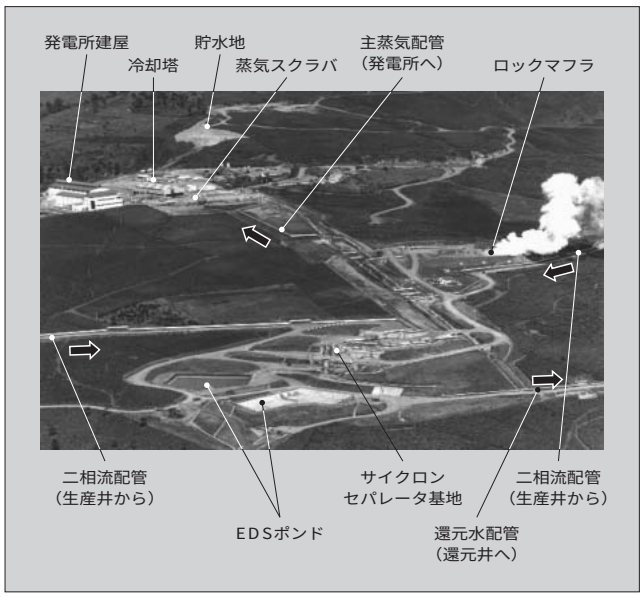
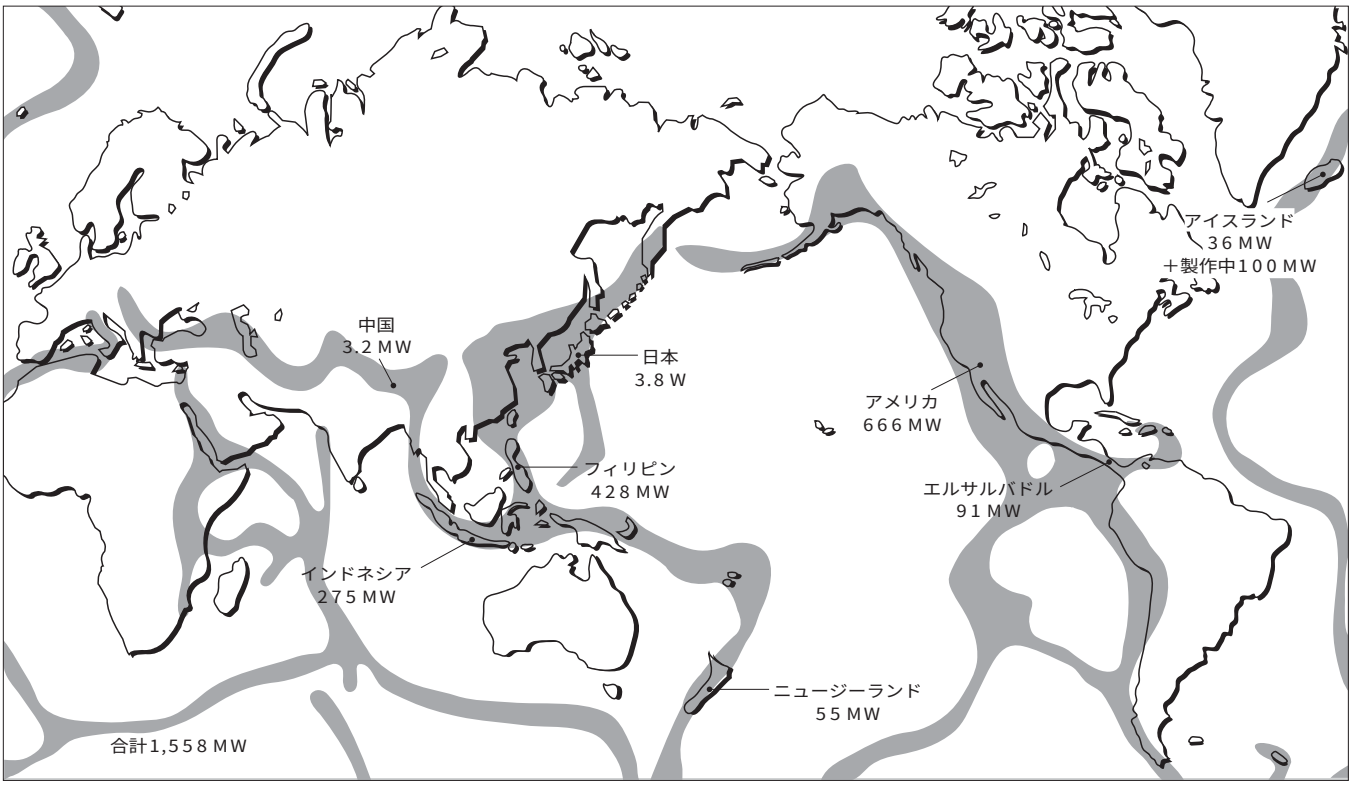


図 2　世界の地熱地帯と富士電機の納入実績



フィリピンで合計約 1,900 MW の予想との乖離が生じている。インドネシアではジャカルタ暴動があり，経済危機と政情不安により地熱発電所建設計画の延期や中止が発表されたことは記憶に新しい。フィリピンでも似たような情勢であり，カントリーリスクの高い国への投資は手控えられたと考えられる。

アイスランドでは地熱発電の計画が進み予想を若干ながらオーバーしている。富士電機は 2004 年 4 月レイキャネス発電所向けに 2×50 MW のタービン発電機を受注し現在製作中である。

図４　ワヤンウィンド生産井基地

世界最大の地熱開発国であるアメリカは，その最大の開発地域であるガイザース地域において過剰な開発によって 1990 年代半ばに貯留層圧力の低下を経験し，還元の必要性が急務となっていた。その一方では，廃水処理システムの老朽化によりアップグレードの必要性に迫られていた。この問題を解決する策として，1996 年に廃水処理プラントの排水を地中に還元するプロジェクトを立ち上げ，現在では，各廃水処理設備から全長 85 km のパイプラインを通して年間 1,000 万トン以上の排水をガイザーズ地区の貯留層に還元している。このことにより貯留層蒸気圧力の増加と寿命の延長，発電出力の増加に結び付いている[(3)]。直近の 5 年間ではソルトンシー 5 号機（58.3 MW）の増設以外に発電所の建設はない。

5　今後の展望

表１にも示したように，計画が大幅に遅れたインドネシアとフィリピンでは経済復興の電力需要に対処するためには，輸出できない地熱資源を最大限利用して国内の電力安定供給を進めると考えられる。海外からの投資を呼び込む優遇措置や国際協力資金の活用などで地熱発電所の建設を進めていくことになろう。両国とも電力公社の民営化を進めており，地熱事業採算性の観点から先行きについては不安定要因も多いものの，低迷期の反動もあり，今後数年間で大幅な地熱発電所の建設が進むと期待している。これらの国の地熱発電建設は EPC（設計・調達・建設）契約が主体となるであろう。富士電機は両国でのプラント建設の

表１　世界の地熱発電設備容量

国　名	地熱発電設備容量（MW）					2000年時点と直近の2005年容量予想の差（MW）
	1990年	1995年	2000年	2005年（予測）(注)	2000年時点の2005年予想	
アメリカ	2,775	2,817	2,228	2,544	2,376	168
フィリピン	891	1,227	1,909	1,931	2,637	−706
メキシコ	700	753	755	953	1,080	−127
イタリア	545	632	785	791	946	−155
日　本	215	414	547	549	567	−18
インドネシア	145	310	590	798	1,987	−1,189
ニュージーランド	283	286	437	435	437	−2
エルサルバドル	96	105	161	151	200	−49
コスタリカ	0	55	143	163	161	2
アイスランド	45	50	170	202	170	32
ケニア	45	45	45	127	173	−46
ニカラグア	35	70	70	78	145	−67
中　国	19	29	29	28	28	0
トルコ	20	20	20	20	250	−230
ロシア	11	11	23	79	125	−46
その他（10か国）	8	10	61	77	108	−30
合　計	5,832	6,834	7,973	8,926	11,390	−2,464

出典：IGA NEWSに掲載のデータを編集
〈注〉2005年（予測）は元IGA事務局長Ruggero Bertani氏の提供データによる。

経験を生かしつつ，ローカルパートナーとのコンソーシアムでの EPC 契約を視野に入れて取り組んでいく。

ニュージーランドでは産業の発達により電力需要が増加している。電力供給の 7 割程度が水力発電で賄われているが，近年の雨量の減少や河川水の水量の時間的変化などの影響で，水力発電以外のベースロードとしての地熱発電が注目されている。本来この国は，1958 年に世界ではじめて熱水型地熱井を利用したフラッシュサイクルをワイラケイ地域にて成功させ，その後の地熱発電の普及に貢献した国であり技術力は高い。古くから地熱発電所を有しており，すでに 470 MW に達している。今後 10 年間に 500 MW 以上の地熱発電設備が建設される可能性もあり，古い設備の更新も見込める。富士電機は，ニュージーランドにはポイピヒ発電所に 55 MW のタービン・発電機を納入し高い信頼性を評価されている。今後はプラントの供給範囲をさらに広げて取り組んでいく。

アメリカでは，2004 年後半に連邦政府による地熱発電向けの Production Tax Credit（PTC）の導入がようやく大統領署名により成立した。正確には従来からあった「Section 45 PTC」の適用範囲を地熱発電にも広げることが決定されたものである。最初の 5 年間の運転に対し 1.5 セント/kWh（Index 付き）の Credit が適用される。ところが，この PTC の適用は 2006 年 1 月 1 日までの運転開始が条件になっているため，新規地熱案件にはメリットがなく，短期間で完成させることができる地熱案件は，ごく少数の小規模のバイナリー案件などに限られている。いずれ適用期間の延長が図られるものと期待している。

アイスランドは，北端は北極圏に入る面積約 10 万 km^2 の島国であるが，ここを大西洋中央海嶺が横断しているため地熱に恵まれている。この国では電力多消費型産業が少なかったため，地熱は主にオフィス，ホテル，各家庭の暖房，給湯，温水栽培，温水プールなどの熱源として利用されてきた。しかしこの国でも産業の発達に伴い，特に 1999 年以降の急激な地熱発電の増加があった。先に述べたレイキャネス地熱発電所で発電した電力は，アルミニウム精錬工場向けに供給されることとなっている。今後の同国の産業の発達に期待する。

6　地熱バイナリー発電

バイナリー発電は熱水温度が比較的低い場合に技術的にも経済的に成立する発電方式として古くから知られていた。原理は地熱流体の熱エネルギーを熱交換器を介し二次側低沸点媒体に与えて蒸発させ，その蒸気でタービンを駆動するものである。タービンを出た後の蒸気の凝縮に空冷式凝縮器を用いることが多く，そのため敷地面積が大きくなり性能面でも外気温度の影響も受けること，また二次側媒体のリークの問題や地熱流体側のスケール付着の問題など課題も多い。しかし，フラッシュサイクルが最低でも 160 ℃以上の蒸気がないと設備としては実現が困難であるが，中低温地熱流体（特に 100 %熱水，100 ～ 150 ℃）でも発電利用が可能であり，完全クローズドサイクルで地熱水を全量地下に還元できること，ガス抽出装置が不要なことなどの種々の長所があり，特に中小容量の発電に適している。海外ではオーマット社が世界に先駆けて二次側の低沸点媒体に有機媒体（ペンタン，ブタンなど）を用いたバイナリー発電を商品化した。OEC（ORMAT Energy Converter）の商品名で 1980 年代後半からアメリカを中心に世界十数箇国に合計 700 MW 程度納入しており，ほぼ独占状態である。小容量の標準シリーズを複数台設置するのが一般的である。

わが国ではサンシャイン計画の一環として 1979 年に 2 基の 1 MW パイロットプラント，その後 1991 年度に独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）により 100 kW 級と 500 kW 級の実証試験を目的とした研究を行っている。富士電機は 2003 年度から NEDO の助成を受けて，商品化のための 250 kW クラスのバイナリー発電実証設備を開発中である。

7　あとがき

地球環境との調和を図りながら，増え続けるエネルギー需要にどう対応していくかは世界全体にとって大きな課題である。

地熱発電は発電量としては全体の中では微々たるものであるが，地熱資源が賦存している地方，地域では大きな割合を占めるエネルギーとなりうる。さらに，今後はさまざまな技術の開発研究によって地熱資源が世界のエネルギー問題の解決に大きく貢献することは間違いない。

富士電機は地熱発電プラントのトータルエンジニアリング，タービン発電機など主要機器の製作，プラント補機の調達と建設工事に豊富な実績とたゆまざる新技術の開発によってエネルギー問題解決の一助とする所存である。

参考文献

(1)　坂口圭一．地熱資源とは．火力原子力発電．vol.55, no.577, 2004, p.53–58.

(2)　中西繁隆ほか．地熱発電の開発の意義と課題．火力原子力発電．vol.55, no.577, 2004, p.87–91.

(3)　Dellinger, M. Lake County Success. Geothermal Bulletin. vol.33, May/June 2004, p.115–119.

(4)　山田茂登ほか．最近の地熱発電設備．富士時報．vol.65, no.11, 1992, p.713–718.

(5)　FUJI ELECTRIC REVIEW. vol.42, no.2, 1996, p.38–72.

(6)　Geothermal Power Generation. FUJI ELECTRIC REVIEW. vol.47, no.4, 2001, p.98–128.

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。